

(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2022 00080

(22) Data de depozit: 16/02/2022

(41) Data publicării cererii:
30/08/2023 BOPI nr. 8/2023

(71) Solicitant:
• INSTITUTUL NAȚIONAL DE
CERCETARE-DEZVOLTARE PENTRU
FIZICA MATERIALELOR- INCDFM,
STR. ATOMIȘTILOR NR.405 A,
MĂGURELE, IF, RO

(72) Inventatori:
• COTIRLAN-SIMIONIUC COSTEL,
CALEA FERENTARI NR. 72, BL. 7C, SC. B,
AP. 13, SECTOR 5, BUCUREȘTI, B, RO

(54) FOTOTRANZISTOR UNIJONȚIUNE ILUMINAT
TRANSVERSAL CU METASUPRAFAȚĂ INTEGRATĂ

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un fototranzistor unijonțiune având rol de modulator și comutator optic controlat electric, care integrează o metasuprafață plasmonică având scopul de a spori interacțiunea luminii cu materia în domeniul spectral 400...750nm, adică în spectrul vizibil. Fototranzistorul conform invenției are o configurație realizată pe un cristal (4) semiconductor de tip p, $ZnRh_2O_4$, transparent în domeniul vizibil, prin depunerea a două straturi (1 și 2) de Al:ZnO (AZO) pentru bazele fototranzistorului care au și rol de contacte ohmice și a unui strat (3) lateral de n-ZnO cu rol de emitor și prin adăugarea unei rețele (5) hexagonale de nanoantene de argint, constituind metasuprafața integrată pe interfața inferioară a cristalului (4) semiconductor.

Revendicări: 2
Figuri: 4

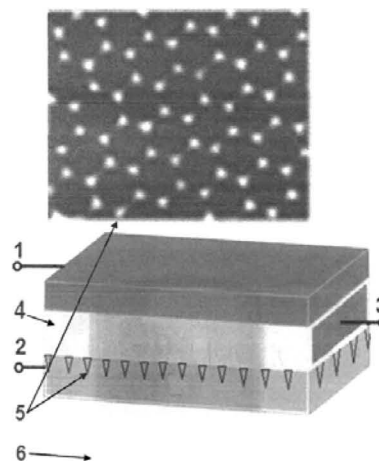


Fig. 1



Fototranzistor unijonctiune iluminat transversal cu metasuprafată integrată

Domeniul tehnic

Prezenta invenție se referă la o componentă optoelectronică pentru comunicații optice cu o structură bazată pe oxizi conductori transparenti și un semiconductor transparent.

Fototranzistorul unijonctiune (FTUJ) propus constituie un modulator și comutator optic controlat electric, care integrează o metasuprafață (MTS) plasmonică, optimizată prin rezonanțe plasmonice de suprafață localizate (RPSL), în scopul de a spori interacțiunea luminii cu materia în domeniul spectral $400 \div 750$ nm, adică în vizibil.

Când nanoparticulele metalice de pe o interfață dielectrică sunt iluminate se induce o oscilație dipolară tuturor electronilor liberi din metal. Electronii vor oscila cu o anumită frecvență, numită frecvență plasmonică, iar când frecvența câmpului electromagnetic devine rezonantă cu oscilația coerentă a electronilor liberi apar așa-numitele rezonanțe plasmonice de suprafață (RPS). În cazul nanoparticulelor metalice aceste RPS sunt localizate la suprafața nanoparticulelor și se numesc rezonanțe plasmonice de suprafață localizate (RPSL). Atunci MTS reprezintă o interfață plasmonică cu grosimea sub lungimea de undă de operare, pe care sunt nanoantene dispuse regulat la distanțe mai mici decât lungimea de undă, pentru a modifica gradat faza luminii.

MTS plasmonică introduce rezoluții spectrale și spațiale mai mari în sistemele optoelectronice pentru telecomunicații și spectroscopice implicate în modularea, analiza și detecția luminii.

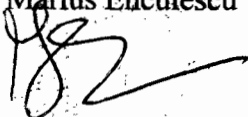
Astfel, caracteristicile unice ale FTUJ justifică utilizarea sa într-o varietate de aplicații: procesoare optice, comunicații optice, generatoare de impulsuri, circuite de declanșare, controloare de fază, circuite de temporizare.

Inovația își propune creșterea capacității de procesare optoelectronică a informației ca un pas premergător în implementarea sistemelor de procesare în întregime optică a informației (all optical computing).

Stadiul tehnicii

Comutarea optoelectronică este o metodă de modulare cu ajutorul semnalelor electrice a intensității fasciculelor de lumină între valori discrete, adică o cuantificare a intensității luminoase. Referindu-ne la Fig. 1, e ca și cum pe emitorul (3) unui fototranzistor străbătut de un fascicul

Director General INCDFM
Dr. Ionuț Marius Enculescu



Dr. Cotîrlan-Simioniuc Costel



luminos se aplică un semnal electric și acest semnal comută între valori discrete intensitatea fascicului transmis între regiunile B1 și B2 cât timp este aplicat.

Modul de funcționare a unui FTUJ cu ajutorul unei MTS active, adică un strat subțire cu confinare optică modulată electric, face posibil controlul spatio-temporal al fasciculelor de lumină exploatare fenomene optice precum refracția, absorbția, imprăștierea eficientă pe purtători de sarcină a luminii, astfel încât structura optică plană poate fi mai subțire decât un cristal optic neliniar conventional sau un alt tip de comutator/modulator optic cu pierderi controlate.

Prezentarea problemei tehnice

În mod normal, comutarea/modularea fasciculelor de lumină se face cu componente optice voluminoase. Structura propusă permite micșorarea masei, complexității, pretului unor ansambluri pentru procesare optică, concomitent cu sporirea vitezei de comutare/modulare.

Utilizare

Se recomandă folosirea acestei componente optoelectronice FTUJ în aplicații de procesare a fasciculelor de lumină și comunicații optice.

Expunerea invenției

Prezenta invenție constă într-o interfață structurată, integrată într-o structură activă compactă pentru controlul comutării. Structura compactă nu introduce inițial mari pierderi optice, pentru că straturile optice ale componentei sunt transparente. Caracterul activ este introdus de posibilitatea de a controla transmisia sau opacitatea structurii, respectiv frecvența de comutare/modulare prin aplicarea unor diferențe de potențial pe electrozii (emitorul și bazele) FTUJ.

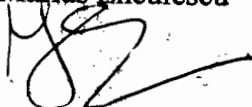
Modul de funcționare

Structura FTUJ este prezentată detaliat în Fig.1, unde am notat:

(1) primul strat de oxid transparent Al:ZnO (AZO) pentru contact electric cu proprietăți plamonice superioare și totodată prima bază a FTUJ depusă pe cristalul semiconductor transparent $ZnRh_2O_4$ tip p;

(2) al doilea strat de oxid transparent și totodată a doua bază a FTUJ;

Director General INCDFM
Dr. Ionuț Marius Enculescu



2

Dr. Cotîrlan-Simioniuc Costel



(3) emitorul structurii FTUJ realizat tot printr-o depunere de oxid transparent ZnO de tip n pe fata laterală a cristalului $ZnRh_2O_4$;

(4) cristalul semiconductor transparent $ZnRh_2O_4$ tip p;

(5) nanoparticulele de argint (Ag) sub forma unor nanoantene tetraedrale dispuse sub forma unei rețele hexagonale pe interfata cu stratul (2) de AZO, care le inglobează și

(6) fasciculul de lumină modulată de FTUJ.

Prin urmare, nanoparticulele de Ag sunt protejate de procesul de măturare de stratul depus ulterior peste ele.

O proiectare simplă face cu putință modularea optică eficientă cu semnale electrice aplicate între bazele (1), (2) și respectiv emitorul (3) cu grosimi comparabile cu lungimea de undă de operare.

Daca viteza de comutare este suficient de mare, atunci procesarea informațiilor optice este semnificativ îmbunătățită.

Prezentarea avantajelor și dezavantajelor

Avantaje

Intrucat au suprafețe plane componentele optice tip FTUJ cu MTS nu introduc aberații optice, dar permit confinarea luminii pe distanțe sub lungimea de undă și un control eficient al transmisiei optice.

Dezavantaje

Structurarea interfetelor prin metode de microlitografie poate fi mai puțin economică deocamdată pe arii mari din cauza tehnologiilor laborioase.

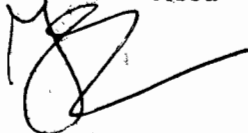
Este necesară o parte de electronică de comandă pentru modularea rapidă a semnalului electric aplicat pe emitorul (3).

Prezentarea pe scurt a figurilor

Prezenta invenție poate fi înțeleasă prin referire la figurile din Anexă:

- Fig. 1 ilustrează structura FTUJ;
- Fig. 2 figurează caracteristicile de comutare: (a) teoretică și (b) reală;
- Fig. 3 arată distribuția indicelui de refracție a structurii FTUJ;
- Fig. 4 redă simbolul FTUJ.

Director General INCDFM
Dr. Ionuț Marius Enculescu



Dr. Cotîrlan-Simioniu Costel



Prezentarea in detaliu a unui mod de realizare

Pentru prima structură, pe o suprafață a semiconductorului transparent $p\text{-ZnRh}_2\text{O}_4$ sunt depuse nanoantene plasmonice din Ag prin tehnica de litografie cu nanosfere de polistiren (LNP), apoi straturi de AZO prin pulverizare cu magnetron (RF sputtering) pe ambele interfețe paralele sau depunere cu laser pulsant (PLD).

LNP oferă un control remarcabil al mărimii, formei și distanței dintre particule de Ag. Lățimea în plan și înălțimea în afara planului nanoparticulelor fabricate cu LNP pot fi reglate independent, cu precizie nanometrică, prin selectarea diametrului nanosferelor utilizate ca masca de depunere sub forma unui cristal coloidal bidimensional (2D) și a grosimii materialului depus.

Forma stratului de nanosfere este controlată de precizia măștii de cristal coloidal 2D sau, alternativ, prin etapele de procesare postdepunere, cum ar fi un tratament termic. În plus, tehnologia LNP este extrem de simplă de implementat, având costuri reduse, materiale destul de generale, este aproape ideală ca platformă pentru studii de teorie și experimente ale proprietăților optice ale nanoparticulelor [Traci, R.J. *et al.* J. Phys. Chem. B, 104, 10549, 2000].

Filmul policristalin de AZO este depus prin PLD pe stratul de nanoparticule de Ag la o temperatură la fel de scăzută ca temperatura camerei. Aceasta depunere este urmată de un tratament termic simplu la o temperatură mai mare și sub atmosferă controlată, pentru a induce creșterea epitaxială în faza solidă. PLD are avantaje superioare față de pulverizarea cu magnetron, inclusiv versatilitate, control asupra ratei de creștere, transfer stoichiometric și grad nelimitat de libertate în geometria ablației.


Stratul de $n\text{-ZnO}$ pentru joncțiune va fi obținut tot prin PLD.

Pentru ZnO conductivitatea de tip n este relativ ușor de realizat prin excesul de Zn sau cu dopaje de Al, Ga sau In. Stratul $n\text{-ZnO}$ depus peste $p\text{-ZnRh}_2\text{O}_4$ formează o heterojuncție $p\text{-n}$, care determină apariția unei regiuni de golire a sarcinii spațiale la interfața solid-solid, ceea ce are ca rezultat o mai bună separare a purtătorilor de sarcină.

În plus, filmul de ZnO permite un contact electric îmbunătățit cu semiconductorul ZnRh_2O_4 . Grosimea și doparea straturilor $p\text{-ZnRh}_2\text{O}_4$ și $n\text{-ZnO}$ pot fi optimizate, pentru ca fotonii fasciculului de intrare să interacționeze puternic cu purtătorii de sarcină din straturile AZO și nanoantenele de Ag, astfel încât să fie modulați eficient de semnalul aplicat pe joncțiunea $p\text{-n}$.

Straturile AZO vor fi optimizate pentru transparență funcție de conductivitate.

Director General INCDFM
Dr. Ionuț Marius Enculescu



Dr. Cotîrlan-Simioniuc Costel



Contactele ohmice (1), (2) pentru baza 1 (B1), baza 2 (B2) și contactul (3) pentru emițător (E) (Fig. 1) ar putea fi formate și prin depunere termică rapidă (RTD).

Tehnologia de fabricare a structurii incluzând litografia cu nanosfere din polistiren

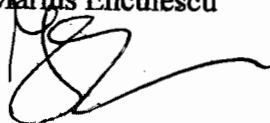
Elementele rezonatoare de pe interfetele FTUJ pentru funcționarea în vizibil se obțin prin litografie cu nanosfere din polistiren. Tehnologia este următoarea:

- substratul $p\text{-ZnRh}_2\text{O}_4$ se degrează prin fierbere în tricloretilena, apoi se clătește în acetona;
- se depune un strat de fotorezist AZ1505 prin spin-coating la 5000 rot./min, timp de 1 minut;
- se aplică un tratament termic la 120°C timp de 50 s într-o etuvă;
- se formează masca de nanosfere ca un cristal coloidal bidimensional pe substrat tot prin spin-coating, tratament termic și se expune structura la radiația UV prin masca cu nanosfere;
- se dezvoltă fotorezistul expus cu AZ 726 MIF într-un timp mai scurt de 1 minut;
- prin PLD sau RF sputtering se depune stratul de 30 nm de metal (Ag) pe substratul pentru MTS;
- cu remover AZ 100 sau acetona se îndepărtează fotorezistul cu stratul metalic și rămân pe interfață antenele de Ag cu o înălțime de 30 nm;
- se protejează fețele laterale cu un strat de rășină și se depune stratul de AZO cu grosime de cel puțin 50 nm prin PLD pe ambele interfețe ale cristalului $p\text{-ZnRh}_2\text{O}_4$, formându-se bazele FTUJ;
- se îndepărtează cu un solvent rășina de pe fețele laterale și se protejează apoi cu rășina suprafețele bazelor;
- se depune ZnO cu grosime de cel puțin 50 nm prin PLD printr-o mască adecvată pe o suprafață laterală a structurii pentru formarea heterojuncțiunii p-n, astfel încât $X_1 < X_2$;
- se îndepărtează rășina de pe baze cu un solvent și se fac sudurile unor fire de contact la bazele și emitorul FTUJ.

Modul în care invenția este susceptibilă a fi aplicată industrial

Aplicația posibilă a FTUJ cu metasuprafață integrată este în procesarea optoelectronică a informațiilor ca un pas de tranziție către procesarea în întregime optică. Tehnologic, noua soluție constructivă permite fabricarea și implementarea materialelor transparente optice cu caracteristici optimizate pentru interacția materiei cu lumina, în scopul de a miniaturiza componentele optoelectronice.

Director General INCDFM
Dr. Ionuț Marius Enculescu



5

Dr. Cotîrlan-Simioniuc Costel



Revendicări

1. Fototranzistor unijonctiune iluminat transversal cu metasuprafată integrată caracterizat prin faptul că are o configurație realizată pe un cristal semiconductor (4) tip $p\text{-ZnRh}_2\text{O}_4$ transparent in vizibil prin depunerea a două straturi (1) si (2) de Al:ZnO (AZO) pentru bazele fototranzistorului si totodată contacte ohmice, respectiv a stratului (3) lateral de $n\text{-ZnO}$ pentru emitor mai aproape de stratul (2) si prin structurarea unei rețele hexagonale (5) de nanoantene de Ag, constituind metasuprafata integrată pe interfata inferioară a cristalului $p\text{-ZnRh}_2\text{O}_4$, pentru sporirea interacțiunii luminii (6) cu materia si comutarea/modularea transmitantei structurii la o frecvență sporită in aplicatii de procesare optoelectronică a fasciculelor luminoase.
2. Fototranzistor unijonctiune iluminat transversal cu metasuprafată integrată conform revendicării 1 caracterizat prin faptul ca metasuprafata integrată in structura transparentă este structurată prin procedura de litografie cu nanosfere din polistiren pentru controlul cu precizie nanometrică a distanțelor dintre nanoantenele tetraedrale (5) de Ag în planul bazei și înălțimii acestora în afara planului, cu selectarea diametrului nanosferelor utilizate ca masca de depunere sub forma unui cristal coloidal bidimensional și a grosimii materialului depus pentru formarea bazei (2).

Director General INCDFM
Dr. Ionut Marius Enculescu



9

Dr. Cotirlan-Simioniuc Costel



Anexa

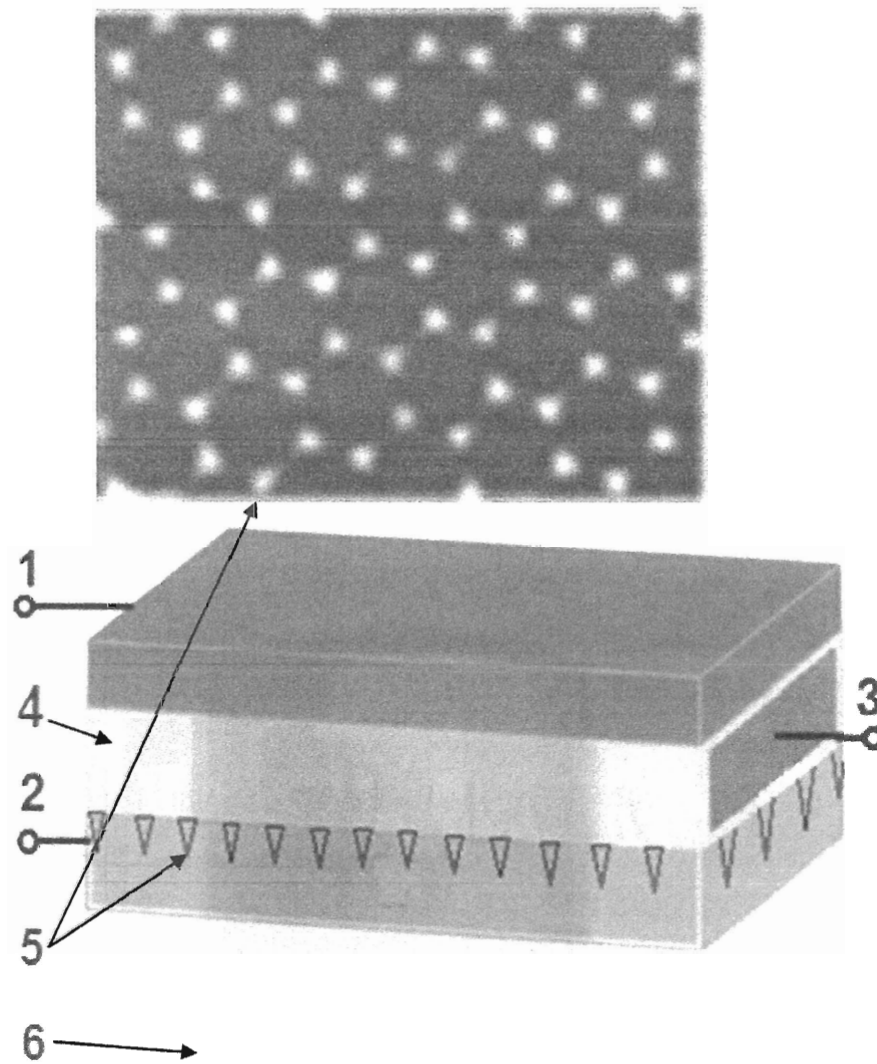
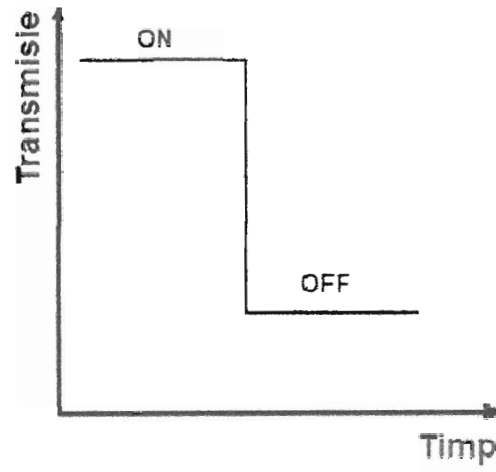


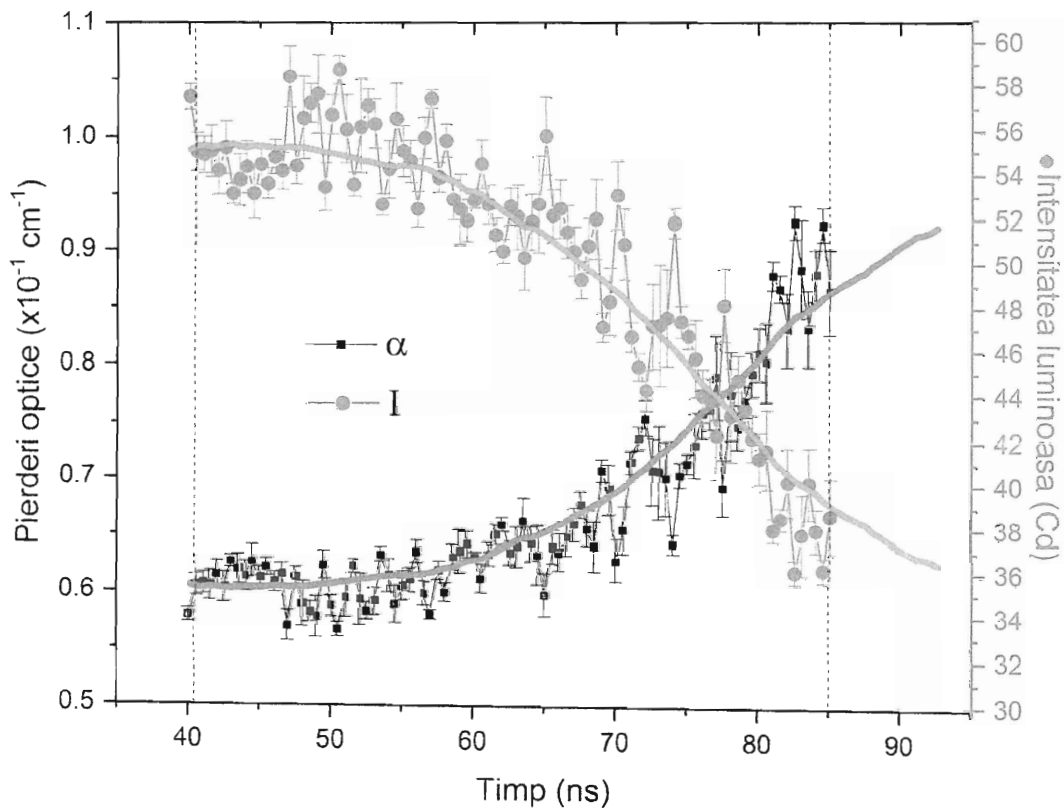
Fig. 1

Director General INCDFM
Dr. Ionut Marius Enculescu

Dr. Cotirlan-Simioniuc Costel



(a)



(b)

Fig. 2

Director General INCDFM
Dr. Ionut Marius Enculescu

Dr. Cotirlan-Simioniuc Costel

22

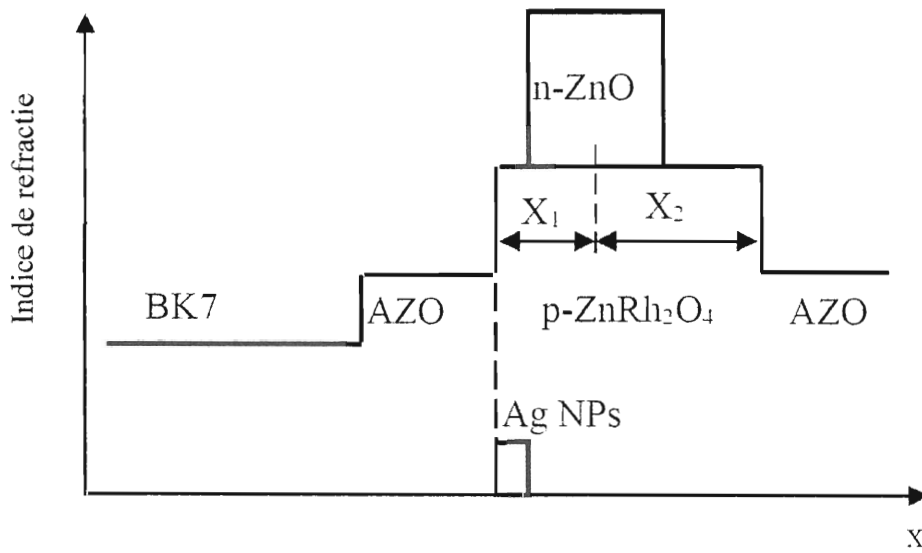


Fig. 3

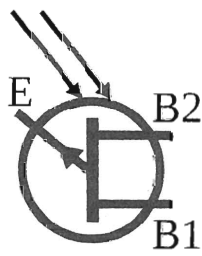


Fig. 4

Director General INCDFM
Dr. Ionut Marius Enculescu

Dr. Cotîrlan-Simioniuc Costel